Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 1, Spring. 2021, p. 91-105

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، ص. ۱۰۵-۹۱

مقاله پژوهشی

اثر غلظت‌های نانوسیلیکون و کودهای زیستی بر عملکرد و دوره پر شدن دانه گندم در رژیم‌های مختلف آبیاری

فرناز احمدی نورالدین‌وند[1*]، رئوف سیدشریفی[2]، سیدعطاءاله سیادت[3]، راضیه خلیل‌زاده[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱

چکیده

به منظور بررسی اثر نانوسیلیکون و کودهای زیستی بر عملکرد و دوره پر شدن دانه‌ی گندم در سطوح مختلف آبیاری، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. عوامل آزمایشی شامل سطوح آبیاری (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰٪ مراحل ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم (آبستنی) به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت ملایم و شدید آبی)، محلول‌پاشی با نانوسیلیکون (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر) و کودهای زیستی (عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، کاربرد قارچ مایکوریزا، کاربرد *فلاوباکتریوم و سودوموناس*، کاربرد توأم مایکوریزا با باکتری‌ها) بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که حداکثر سرعت پر شدن دانه (۳/۰۴ میلی‌گرم در روز)، طول دوره پر شدن دانه (۳۷ روز)، دوره موثر پر شدن دانه (۳۰/۴۴ روز) و عملکرد دانه (۴۵۹۳ کیلوگرم در هکتار) از کاربرد توأم کودهای زیستی و محلول‌پاشی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد. همچنین حداکثر محتوی کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید (به‌ترتیب ۲/۰۴، ۰/۹۳، ۲/۸۷ و ۹/۸۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) از محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون و تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد. بیشترین وزن و حجم ریشه از محلول‌پاشی۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون و کاربرد مایکوریزا در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد. حداکثر شاخص سطح برگ از کاربرد مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد و محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد. به‌نظر می‌رسد کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون می‌تواند به‌عنوان فاکتورهای مدیریتی مناسب برای افزایش عملکرد دانه و دوره پر شدن دانه گندم در شرایط محدودیت آبی توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: باکتری‌های محرک رشد، رنگیزه‌های فتوسنتزی، خشکی، قارچ *موسه‌آ*، نانو ذرات

مقدمه

تنش آبی مهم‌ترین عامل کاهش عملکرد گیاهان زراعی است که می‌تواند به‌طور تقریبی موجب محدودیت تولید در ۲۵ درصد زمین‌های زراعی شود (Biglouie *et al.*, 2010). در چنین شرایطی به‌نظر می‌رسد استفاده از برخی عناصر و کودها می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مناسب در جهت تعدیل یا کاهش آثار ناشی از این تنش محسوب شود. سیلیکون (سیلیسیم) دومین عنصر فراوان بعد از اکسیژن در خاک است و در بسیاری از گیاهان در شرایط بهینه و طبیعی، به‌عنوان یک عنصر ضروری مطرح نیست، چرا که گیاهان چرخه زندگی خود را می‌توانند بدون این عنصر کامل کنند ولی کاربرد منابع خارجی این عنصر می‌تواند منجر به ارتقای رشد و افزایش تحمل گیاهان زراعی به تنش‌های مختلف زیستی و غیر زیستی شود (Hadi *et al.*, 2016). در واقع استفاده از نانو ذرات سیلیکون برای تحریک رشد و نمو گیاه و همچنین کاهش آسیب‌های ناشی از تنش‌های محیطی از قبیل تنش خشکی در گیاهان شناخته شده است (Roychoudhury, 2020). به‌طوری‌که، گزارش شده است سیلیکون استحکام برگ‌ها، محتوای کلروفیل، فعالیت آنزیم روبیسکو و سرعت فتوسنتز را افزایش و پیری برگ‌ها را به تأخیر می‌اندازد (Liu *et al.*, 2013). نتایج برخی بررسی‌ها نشان داد محلول‌پاشی سیلیکون تا حدودی اثر منفی محدودیت آبی بر عملکرد گندم را کاهش داده و بیشترین عملکرد دانه در کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیکون و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم غیر نانو به‌دست آمد (Parsapour *et al.*, 2019). برخی محققان تأثیر مثبت سیلیکون بر رشد گیاه را به اثر این ماده در

۱- دانشجوی دکترای فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی
۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی
۳- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۴- دکترای فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: Farnaz_ahmadi@rocketmail.com)
DOI: 10.22067/jcesc.2021.67258.0

افـزایش حجـم و وزن ریشـه‌هـا، نسـبت دادنـد (Dakora and Nelwamondo, 2003).

یکی دیگر از راهکارهای اساسی برای تعدیل یا کاهش اثر تـنش آبی در گیاهـان زراعـی، کـاربرد انـواع مختلفـی از کودهـای زیسـتی (باکتری‌ها و قارچهای مفید خاک‌زی) است (Marulanda Aguirre *et al.*, 2008). این کودها از ریز موجودات مفید خاک تهیه و کـارایی بالایی از نظر فراهم‌سازی عناصر غذایی به شکل قابـل جـذب را، دارا می‌باشند (Chen, 2006). برخی محققـین افـزایش عملکـرد و طـول دوره‌ی پر شدن دانـه گنـدم بـا کـاربرد کودهـای زیسـتی در شـرایط محدودیت آبی را به اثر هم‌افزایی بین بـاکتری‌هـای محـرک رشـد و مایکوریزا نسبت دادند که موجب می‌شـود بـا تـأمین عناصـر غـذایی، ضمن افزایش سرعت پر شدن دانه، امکان تداوم بیشتر دوره پر شـدن دانه را فراهم کنند (Seyed Sharifi, 2018). محققین در مطالعـه‌ای روی گنـدم، افـزایش رنگیـزه‌هـای فتوسـنتزی را در مصـرف انـواع باکتری‌های محرک رشد به‌ویژه مصرف توأم آن‌ها گـزارش کـرده‌انـد (Mozafari *et al.*, 2016). برخی پژوهشگران علت افزایش رشـد و عملکرد گیاهان در کاربرد باکتری‌های محرک رشد را، به نقش آن‌هـا در تولید اکسین، افزایش مقاومت گیاهـان در برابـر تـنش‌هـا، تثبیـت نیتروژن، تغییر روابط هورمونی و افزایش سطح فتوسـنتز گیـاه نسـبت داده‌انـد (Salantur, 2006). قـارچهـای مـایکوریزا گرچـه ترکیبـات کربوهیدراتی مورد نیاز خود را از گیاه میزبان دریافت می‌کنند، ولی بـا کمک به افزایش جذب مواد غذایی توسط گیاه، بهبود تثبیت نیتروژن، افزایش فتوسنتز موجب بهبود تحمل گیاهان به تنش‌های غیرزیسـتی مانند خشکی و شوری می‌شـوند (Khalafalla and Abo-Ghalia., 2008).

با توجه به اهمیت گندم به‌عنوان یکی از محصـولات اسـتراتژیک کشور و خسارت ناشی از محدودیت آبی در بیشتر مناطق تحت کشت به‌خصوص در دوران پس از گلدهی که از مهمتـرین عامـل مـوثر بـر کاهش عملکرد این گیاه محسوب می‌شود، و از طرفی به‌دلیـل نقـش کودهای زیستی (باکتری‌های محرک رشد و مایکوریزا) و نانوسیلیکون در کاهش یا تعدیل اثر ناشی از محدودیت آبی و بررسی‌هـای محـدود انجام شده در خصوص بر همکنش توأم این عوامل، موجب شد تا اثـر این عوامل آزمایشی بر عملکـرد و دوره پـر شـدن دانـه گنـدم مـورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌هـای کامـل تصادفی (Kheirizadeh Arough *et al.*, 2016) با سه تکـرار طـی سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجـه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجـه و ۱۵ دقیقـه عـرض شـمالی و ارتفـاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا اجرا شد. مشخصات اقلیمـی در سـال اجـرای آزمایش در جدول ۱ و نتایج آزمون خاک محل آزمـایش در جـدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای جوی ثبت شده در طول دوره رشدی گندم (مأخذ: اداره کل هواشناسی استان اردبیل)

Table 1- Atmospheric parameters recorded during the period of wheat growth (Source: General Meteorological Department of Ardabil Province)

ماه‌ها Months	بارندگی Rainfall (mm)	میانگین دما Temperature mean (°C)	جمع ساعات آفتابی Total hours of sunshine	میانگین رطوبت نسبی Relative humidity mean (%)
مهر Oct	43.6	11.8	201.3	72
آبان Nov	9.7	11.7	166.5	64
آذر Des	6.5	3	177.3	70
دی Jan	16.5	4.6	165.4	67
بهمن Feb	54.8	0.06	128.7	77
اسفند MA	26.5	7	157.5	73
فروردین Apr	9.3	9	170.9	66
اردیبهشت May	60.3	12.3	196.3	71
خرداد Jun	28.2	16.8	148.6	71
تیر Jul	3.9	21.5	344.2	60
مرداد Aug	0.9	25.3	255.6	69

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه
Table 2- Farm soil physicochemical properties

عمق خاک Soil depth (cm)	عصاره اشباع Saturated extract	pH	ساختار Structure	آهک $CaCO_3$	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	کربن آلی Organic carbon	نیتروژن قابل جذب N	فسفر قابل جذب P	پتاسیم قابل جذب K	روی Zn
				%					mg.kg^{-1}			
0-30	49	7.8	لومی Loam	14.4	23	42	35	0.62	0.06	8.29	202	1.8

عوامل آزمایشی شامل سطوح آبیاری (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰٪ مرحله ظهور سنبله و تورم غلاف برگ پرچم (آبستنی) به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت ملایم و شدید آبی بر اساس کد ۵۵ و ۴۳ مقیاس BBCH)، محلول‌پاشی نانوسیلیکون در سه سطح (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر) و کودهای زیستی در چهار سطح (عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، کاربرد قارچ مایکوریزا، کاربرد باکتری‌های محرک رشد، *فلاوباکتریوم و سودوموناس*، کاربرد توأم قارچ با باکتری‌ها) بودند. محلول‌پاشی نانوسیلیکون در دو مرحله ساقه‌دهی و مرحله قبل از تورم غلاف برگ پرچم یا آبستنی (به‌ترتیب معادل با کد ۳۰ و۴۳ بر اساس مقیاس BBCH) اعمال شد. نانوسیلیکون ($Nano-SiO_2$) با اندازه ذرات ۲۰ تا ۳۰ نانومتر محصول شرکت آمریکایی US Research Nanomaterial بوده که از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه گردید. به‌دلیل حلالیت بهتر نانوسیلیکون در آب، ابتدا در آب دی‌یونیزه به‌صورت معلق درآمده و با استفاده از لرزش و ارتعاشات دستگاه اولتراسونیک (۱۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه) این مواد پخش شده و محلول گردید (Prasad *et al.*, 2012). همچنین قارچ مورد استفاده *Glomus mosseae* بود که از شرکت زیست فناوران توران تهیه و به‌میزان ۲۰ گرم در هر مترمربع خاک (۲۰۰ کیلوگرم درهکتار) به‌روش استاندارد و توصیه شده مصرف شد (Gianinazzi *et al.*, 2001). مایه تلقیح باکتری‌های *فلاوباکتریوم و سودوموناس* از موسسه خاک و آب تهیه شد که هر گرم آن دارای 10^8 عدد باکتری زنده و فعال بود. از محلول صمغ عربی برای چسبندگی بهتر مایه تلقیح به بذرها استفاده شد. بدین صورت‌که بذرها به مدت دو ساعت در مایه تلقیح و در شرایط تاریکی قرار گرفتند. بذر مورد استفاده رقم میهن بود که از مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی اردبیل تهیه شد. این رقم دارای تیپ رشد زمستانه، با وزن صد دانه ۴/۵ گرم، نیمه‌متحمل به بیماری‌های زنگ قهوه‌ای و سیاه و متحمل به زنگ زرد است. هر واحد آزمایشی دارای پنج ردیف کاشت با فواصل بین ردیفی ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بذر در متر مربع (تراکم مطلوب و توصیه شده این رقم) بود. کاشت در ۱۲ آبان ماه انجام شد. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیطی، نیاز گیاه زراعی و به استناد سطوح ذکر شده در آزمایش انجام شد. به‌منظور اطمینان از عدم تداخل آب آبیاری به کرت‌های مجاور، فاصله‌ی بین کرت‌ها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که آفت و بیماری مشاهده نگردید هیچ‌گونه مبارزه شیمیایی در طول دوره رشد صورت نگرفت. برای اندازه‌گیری محتوای کلروفیل، نمونه‌برداری ده روز بعد از ظهور سنبله صورت گرفت. سپس با استون ۸۰ درصد و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV-2100 در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر بر اساس روابط (۱) تا (۴) استخراج شد (Arnon, 1949).

$$Chl_a= [19.3\ (A_{663}) - 0.86\ (A_{645})]\ V/\ (1000 \times W) \quad (۱)$$

$$Chl_b= [19.3\ (A_{645}) - 3.6\ (A_{663})]\ V\ (1000 \times W) \quad (۲)$$

$$Total\ chl= [20.2\ (A_{645}) +8.02\ (A_{663})]\ V/\ (1000 \times W) \quad (۳)$$

$$Carotenoides= [1000\ (A_{470}) - 1.8\ (Chl_a) - 85.02\ (Chl_b)] + 1/198 \quad (۴)$$

در این روابط V حجم نمونه استخراج شده و W وزن تر نمونه است. شاخص سطح برگ در مرحله ۵۰ درصد گلدهی اندازه‌گیری شد. به‌منظور اندازه‌گیری مولفه‌های پر شدن دانه، نمونه‌برداری در فواصل زمانی هر چهار روز یکبار انجام شد. در این مرحله سه بوته با ظاهر یکنواخت و مشابه انتخاب گردید. و پس از انتقال به آزمایشگاه، دانه‌ها از سنبله جدا و بعد از قرارگیری در آون، خشک شدند. سپس وزن خشک تک بذر از محاسبه وزن خشک کل به تعداد بذر برآورد شد (Ronanini *et al.*, 2004). به‌منظور تجزیه و تحلیل و تفسیر پارامترهای سرعت پر شدن دانه، طول دوره پر شدن دانه و دوره موثر پر شدن دانه، از یک مدل رگرسیون خطی (دو تکه‌ای) براساس رویه DUD و دستورالعمل Proc Nlin نرم‌افزار SAS 9.4 از رابطه (۵) استفاده شد.

$$GW = \begin{cases} a + bt_0 & t < t_0 \\ a + bt & t \geq t_0 \end{cases} \quad (۵)$$

در این رابطه GW وزن دانه، t زمان و b سرعت پر شدن دانه، t_0 پایان دوره پر شدن دانه و a عرض از مبدأ است. این مدل تغییرات وزن دانه نسبت به زمان را به دو مرحله تفکیک می‌کند: مرحله اول که در حقیقت مرحله خطی پر شدن دانه است، وزن دانه تا رسیدن به حداکثر مقادیر خود در زمان t_0 که در حقیقت زمان رسیدگی وزنی

است، به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. شیب خط رگرسیون در این مرحله ($t<t_0$) سرعت پر شدن دانه را نشان می‌دهد (Ellis and Pieta-Fiho, 1992). با پردازش این مدل بر کلیه داده‌ها ابتدا دو پارامتر مهم پر شدن دانه یعنی سرعت پر شدن دانه و زمان رسیدگی وزنی به‌دست آمده و سپس مقدار عددی t_0 در قسمت دوم رابطه قرار داده شد و GW که وزن دانه است محاسبه شد. برای تعیین دوره موثر پر شدن دانه از رابطه (۶) استفاده شد (Ellis and Pieta-Fiho, 1992).

$$EFP = MGW/b \quad (۶)$$

در این رابطه EFP[1] دوره موثر پر شدن دانه، MGW[2] حداکثر وزن دانه و b شیب خط یا سرعت پر شدن دانه است. به منظور اندازه‌گیری وزن و حجم ریشه، قبل از کاشت در ردیف‌های اصلی هر واحد آزمایشی، تعدادی کیسه‌های پلاستیکی به قطر ۳۵ سانتی‌متر در عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک و هم سطح با دیگر خطوط کاشت قرار داده شد. تراکم کاشت در این کیسه‌ها مشابه تراکم دیگر قسمت‌های کاشته شده در نظر گرفته شد. بعد از برداشت بوته‌ها، خارج‌سازی ریشه‌ها از کیسه‌ها (از سطحی معادل ۰/۱ مترمربع) برای اندازه‌گیری وزن و حجم ریشه، انجام شد. ریشه‌ها برای خشک شدن در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت یا بیشتر (تا زمان تثبیت وزن خشک نهایی) قرار داده شد و سپس وزن خشک ریشه با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شد. حجم ریشه با استفاده از حجم مشخصی از آب در استوانه مدرج اندازه‌گیری شد طوری‌که اختلاف حجم ایجاد شده پس از ورود ریشه‌ها در آب استوانه مدرج به‌عنوان حجم ریشه منظور شد. اندازه‌گیری عملکرد دانه از دو خط اصلی هر کرت با رعایت اثر حاشیه‌ای از سطحی معادل ۰/۲ متر مربع براورد شد. برای تجزیه داده‌ها و رسم شکل‌ها از نرم‌افزارهای SAS 9.1 و Excel نسخه 2003 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس و مقایسه میانگین تاثیر عوامل مورد بررسی بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، شاخص سطح برگ، مولفه‌های پر شدن دانه و عملکرد دانه در جدول‌های ۳ تا ۸ آورده شده است.

محتوای کلروفیل و کاروتنوئید: بر اساس جدول تجزیه واریانس اثر سه‌گانه فاکتورهای آزمایشی در سطح احتمال یک درصد بر محتوای کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش شدت تنش آبی از محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی کاسته شد درصورتی‌که با کاربرد نانوسیلیکون و کودهای زیستی، محتوی کلروفیل کاهش کمتری را نشان داد (جدول ۴). طوری‌که بیشترین محتوای کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید (به‌ترتیب ۲/۰۴، ۰/۹۳، ۲/۸۷ و ۹/۸۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ) از محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون و کاربرد باکتری‌های محرک رشد در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد. در واقع تنش کمبود آب با بستن روزنه‌ها و تخریب کلروفیل و کلروپلاست باعث کاهش فتوسنتز می‌شود (Wen-Bin *et al.*, 2009). تنش خشکی همچنین با افزایش برخی از تنظیم‌کننده‌های رشد نظیر اتیلن و آبسیزیک اسید، فعالیت کلروفیلاز را تحریک و موجب تجزیه کلروفیل می‌شود. از این رو به نظر می‌رسد کاهش محتوای کلروفیل در این تحقیق احتمالاً می‌تواند به‌دلیل کاهش سنتز کلروفیل و افزایش تجزیه آن باشد. به‌نحوی‌که، مطالعات نشان داده است کاربرد سیلیکون در شرایط تنش، به‌دلیل کاهش تولید پراکسید هیدروژن، موجب افزایش مقدار کلروفیل، فعالیت بیوفسفات کربوکسیلاز و فتوسنتز برگ‌ها می‌شود (Gong *et al.*, 2003). نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان مبنی بر افزایش محتوای رنگدانه‌های مختلف فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b، کل و کاروتنوئیدها) در گیاهان زراعی تحت تنش کم آبی با کاربرد سیلیکون گزارش شده است (Merwad *et al.*, 2018). از طرفی، سیلیکون با قرار گرفتن در آپوپلاسم دیواره‌های خارجی سلول‌های اپیدرمی، علاوه بر استحکام برگ موجب تولید بافت ناهمواری در دو سطح برگ می‌شود که این امر ضمن به تأخیر انداختن مرگ برگی، موجب افزایش محتوای کلروفیل و کاهش میزان تعرق روزنه‌ای می‌گردد (AL-Aghabary *et al.*, 2004). همچنین پژوهشگران در آزمایش‌های خود اظهار داشتند که یکی از دلایل تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر محتوای کلروفیل برگ، افزایش میزان دسترسی گیاه به نیتروژن از طریق تثبیت آن است. در واقع وجود کلروفیل به‌عنوان مکانی برای جذب نور و سنتز مواد لازم برای رشد و نمو گیاهان، وابسته به این عنصر حیاتی است. چنانچه نیتروژن در دسترس، کم‌تر یا بیشتر از حد نیاز گیاه باشد، اختلالاتی را در فرآیندهای حیاتی موجب می‌شود که ممکن است به صورت‌های مختلفی نظیر رشد و نمو زیاد، کاهش تعرق و یا حتی توقف رشد زایشی بروز نماید (Mohammdaparst *et al.*, 2019).

شاخص سطح برگ در مرحله گلدهی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که شاخص سطح برگ تحت تأثیر سطوح آبیاری، کودهای زیستی و نانو سیلیکون قرار گرفت (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که قطع آبیاری در مرحله آبستنی موجب کاهش ۲۵ درصدی شاخص سطح برگ گندم نسبت به آبیاری کامل شد (جدول ۵). نتایج مشابهی نیز مبنی بر این‌که تنش خشکی ملایم و شدید موجب کاهش سطح برگ می‌شود توسط محققین گزارش شده است (Basal and Szabó, 2020). تحقیقات نشان داده است که سیلیکون

1- Effective grain filling period
2- Max grain weight

به دلایل مختلفی از جمله تاخیر در پیری بـرگ، افـزایش اسـتحکام و ضخامت برگ و برافراشته ماندن برگ‌ها موجب افزایش سـطح بـرگ گیاهـان مـی‌شـود (Savvas *et al.*, 2015). همچنـین قـارچ‌هـای مایکوریزا به دلیل بهبود دسترسی به آب و جذب بهتر عناصر بـه‌ویـژه نیتروژن و فسفر و نیز افزایش فعالیت احیاکننده نیترات یعنـی نیتـرات ردوکتاز و سنتز پروتئینی می‌توانند موجب افـزایش سـطح بـرگ گیـاه شوند (Giri *et al.*, 2004). بخشی از بهبود شاخص سـطح بـرگ در کاربرد کودهای زیستی را می‌توان به تاثیر این رنگدانه‌هـا در افـزایش محتوای کلروفیل نسبت داد (جدول ۴)، چرا که برخی محققان افزایش سطح برگ تحت تنش آبی در گیاهان کلـونیزه شـده بـا مـایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد را، به کاهش پیری برگ به‌واسـطه افـزایش تولید کلروفیل یا کاهش تخریب آن نسبت دادنـد (Boomsma and Vyn, 2008).

وزن خشک و حجم ریشه: وزن خشک و حجـم ریشـه تحـت تأثیر سطوح آبیاری، محلول‌پاشی نانوسیلیکون و کودهای زیستی قـرار گرفت (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین وزن و حجـم ریشه از کاربرد مایکوریزا در شـرایط آبیـاری کامـل و بـا مصـرف ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون و کمترین آن در شرایط تـنش خشـکی شدید و عدم کاربرد کود زیستی و نانوسیلیکون به‌دسـت آمـد (جـدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین وزن ریشـه (۲۲/۷۰، ۲۳/۲۴ و ۲۲/۸۶ گـرم در مترمربـع) و حجـم آن (۵۵/۹۲، ۵۷/۷۷ و ۶۳/۳۳ سانتی‌مترمکعب) به‌ترتیـب از کـاربرد مـایکوریزا و محلـول‌پاشـی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمـد. در واقع سیلیکون تحت شرایط تنش با حفاظت از استوانه آوندی به‌عنوان یک حامل مکانیکی که باعث سـخت شـدن دیـواره سـلولی اسـتوانه آوندی و بافت آندودرمی می‌شود، رشد طولی ریشه را افزایش می‌دهـد (Datnoff *et al.*, 2001). از این رو تغذیـه بهینـه سـیلیکون موجـب افزایش رشد و توسعه حجمی و وزنی ریشـه‌هـا و در نهایـت، موجـب افزایش سطح کل جذب‌کننده عناصر مـی‌شـود (Sun *et al.*, 2005). همچنین آبیاری کامل سبب افزایش ۳۶ و ۶۵ درصـدی وزن و حجـم ریشه نسبت به تنش خشکی شدید شد. بـه‌نظر مـی‌رسـد در شـرایط خشکی چون خاک به دلیل عـدم آبیـاری سـفت و سـخت مـی‌شـود بنابراین امکان رشد و نفوذ ریشه‌ها و در نتیجه جـذب عناصـر غـذایی محلول در خاک کاهش پیدا می‌کند. از طرفی در شـرایط تـنش آبـی، روزنه‌های هوایی بسته‌تـر شـده، میـزان فتوسـنتز کـاهش یافتـه و در نهایت رشد ریشه کاهش یافته و بدین طریق ظرفیت جـذب و انتقـال آب و عناصر غذایی از خاک به طرف اندام هوایی کاهش می‌یابـد. در چنین شرایطی کاربرد مایکوریزا می‌تواند موجب افزایش وزن و حجـم ریشه نسبت به عدم کاربرد آن شود. برخی معتقدند گیاهان برخوردار از مایکوریزا با اثر بر سیستم ریشه از طریق ایجاد هیف و گسـترش ایـن سیستم در طول ریشه و اثر بر جذب عناصر و رشد، با کمک به جـذب رطوبت و عناصر غذایی، منجر به تحمـل شـرایط نامسـاعد محیطـی می‌شوند (Turk *et al.*, 2006).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی تحت تأثیر فاکتورهای آزمایشی

Table 3- Analysis of variance morphological and physiological traits under experimental factors

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean squares						
		شاخص سطح برگ Leaf area index	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	وزن خشک ریشه Root dry weight	حجم ریشه Root volume
Replication تکرار	2	0.046	0.035	0.033	0.100	0.413	6.039	86.11
Irrigation (I) آبیاری	2	1.623**	0.99*	0.17ns	0.200*	2.805**	390.29**	5658.33**
Biofertilizer (B) کود زیستی	3	0.899**	2.338**	0.445**	4.778**	53.321**	208.91**	1030.55**
Nano-Si (N-Si) نانوسیلیکون	2	0.237**	0.540**	0.050*	0.911**	27.376**	460.77**	2275.00**
I×B	6	0.030ns	0.522**	0.110**	1.023**	14.947**	19.035ns	225.00*
I×N-Si	4	0.018ns	0.264**	0.013ns	0.323**	10.097**	142.97*	137.50ns
B×N-Si	6	0.034ns	0.382**	0.064**	0.746**	5.739**	21.86ns	115.74ns
I× B× N-Si	12	0.023ns	0.356**	0.049**	0.637**	8.252**	17.86ns	33.79ns
Error اشتباه آزمایشی	70	0.027	0.015	0.011	0.033	0.549	27.90	62.30
ضریب تغییرات C.V (%)	-	11.4	10.8	26.3	11.8	16.0	27.6	15.7

ns, * and ** indicating non-significant and significant at 5 and 1 % level, respectively

ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ ٪

جدول ٤- مقایسه میانگین رنگیزه‌های فتوسنتزی متأثر از کاربرد کودهای زیستی، نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری

Table 4- Means comparison Photosynthetic pigments as affected of bio-fertilizer, nano silicon under irrigation withholding condition

سطوح آبیاری Irrigation levels	ترکیب تیماری Treatments	کلروفیل a Chlorophyll a ($mg.g^{-1} FW^{-1}$)	کلروفیل b Chlorophyll b ($mg.g^{-1} FW^{-1}$)	کلروفیل کل Total Chlorophyll ($mg.g^{-1} FW^{-1}$)	کاروتنوئید Carotenoid ($mg.g^{-1} FW^{-1}$)
I_1	B_0S_0	1.30	0.52	1.34	3.51
	B_1S_0	1.19	0.52	1.70	5.59
	B_2S_0	1.43	0.59	1.99	5.82
	B_3S_0	1.31	0.42	1.67	4.20
	B_0S_1	1.25	0.38	1.64	4.37
	B_1S_1	1.93	0.74	2.67	8.10
	B_2S_1	1.94	0.73	2.78	9.50
	B_3S_1	1.67	0.67	2.20	4.31
	B_0S_2	1.14	0.30	1.23	3.67
	B_1S_2	1.42	0.42	1.94	8.17
	B_2S_2	2.04	0.93	2.87	9.89
	B_3S_2	1.60	0.55	2.16	6.83
I_2	B_0S_0	0.85	0.36	1.22	2.49
	B_1S_0	0.99	0.43	1.58	4.23
	B_2S_0	1.20	0.50	1.77	4.21
	B_3S_0	1.10	0.34	1.56	4.18
	B_0S_1	1.08	0.36	1.17	2.16
	B_1S_1	1.12	0.35	1.48	4.24
	B_2S_1	1.22	0.50	1.73	4.66
	B_3S_1	1.07	0.36	1.23	4.61
	B_0S_2	0.75	0.23	0.98	3.07
	B_1S_2	1.23	0.47	1.61	4.13
	B_2S_2	1.88	0.29	2.55	8.01
	B_3S_2	1.14	0.37	1.68	5.14
I_3	B_0S_0	0.55	0.19	0.80	0.81
	B_1S_0	0.95	0.23	1.00	2.65
	B_2S_0	0.82	0.24	1.47	3.29
	B_3S_0	0.96	0.28	0.93	2.41
	B_0S_1	0.63	0.32	0.95	2.88
	B_1S_1	0.85	0.25	1.02	4.16
	B_2S_1	0.71	0.29	1.38	4.41
	B_3S_1	0.85	0.23	1.10	3.85
	B_0S_2	0.69	0.25	0.98	2.25
	B_1S_2	0.86	0.30	0.85	3.31
	B_2S_2	0.92	0.35	1.14	6.58
	B_3S_2	0.75	0.33	1.40	4.56
	LSD	0.38	0.17	0.48	1.58

I_1، I_2 و I_3: به‌ترتیب آعدم تنش، تنش ملایم و تنش شدید B_0، B_1، B_2 و B_3: به‌ترتیب عدم تلقیح، تلقیح با قارچ، تلقیح با باکتری و تلقیح توأم قارچ و باکتری

S_0، S_1 و S_2: به‌ترتیب شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون

I_1, I_2 and I_3: No stress, Mild stress Severe stress; B_0, B_1, B_2 and B_3: Non-inoculated, Inoculated with *Mycorrhiza*, Inoculation with bacteria and Co-inoculation of *Mycorrhiza* and bacteria; S_0, S_1 and S_2: 0, 30 and 60 mg L^{-1}

مولفه‌های پر شدن دانه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی، نانو سیلیکون و اثر ترکیب تیماری این عوامل بر طول دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن دانه و دوره موثر پر شدن دانه در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۶).

بررسی روند تغییرات پر شدن دانه نشان داد که ابتدا وزن دانه به‌صورت خطی افزایش یافته و به حداکثر خود رسید. پس از این مرحله وزن دانه از تغییرات چندانی برخوردار نبوده و به‌صورت یک خط افقی درآمد (شکل ۱). مقایسه میانگین‌ها (جدول ۷) نشان داد که سرعت پر شدن دانه در محلول‌پاشی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون و تلقیح توأم بذر با باکتری‌های محرک رشد و قارچ مایکوریزا در شرایط آبیاری کامل، از افزایش ۶۷ درصدی نسبت به عدم تلقیح بذر با کودهای زیستی و عدم محلول‌پاشی با سیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود.

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات شاخص سطح برگ، وزن و حجم ریشه تحت تأثیر فاکتورهای آزمایشی

Table 5- Means comparison LAI, root weight and volume traits under experimental factors

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments	شاخص سطح برگ Leaf area index	وزن خشک ریشه Root dry weight (gr m^{-2})	حجم ریشه Root volume (cm^{-3})
Irrigation levels سطوح آبیاری			
Normal irrigation آبیاری نرمال	2.81^{a}	22.86^{a}	63.33^{a}
Moderate water limitation محدودیت ملایم آبی	2.31^{b}	17.82^{b}	49.16^{b}
Severe water limitation محدودیت شدید آبی	2.12^{c}	16.67^{b}	38.33^{c}
Nano silicon (mg.l^{-1}) نانوسیلیکون			
Control شاهد	2.29^{b}	16.81^{b}	41.94^{c}
30 (mg.l^{-1})	2.56^{a}	17.31^{b}	51.11^{b}
60 (mg.l^{-1})	2.43^{a}	23.24^{a}	57.77^{a}
Bio fertilizers کودهای زیستی			
Non-inoculated شاهد	2.1^{d}	16.39^{c}	41.48^{c}
Mycorrhiza تلقیح با قارچ	2.3^{c}	22.70^{a}	55.92^{a}
کاربرد توام *فلاوباکتریوم و سودوموناس* Both application of *Flavobacterium* and pseudomonas	2.52^{b}	17.56^{bc}	51.48^{b}
کاربرد توام *فلاوباکتریوم و سودوموناس* با مایکوریزا Both application pseudomonas and *Flavobacterium* with *mycorrhiza*	2.81^{a}	18.81^{b}	52.22^{ab}

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون و عامل اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال خطای پنج درصد بر اساس آزمون LSD ندارند.

Means in each column and factors followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using LSD test.

جدول ٦- تجزیه واریانس عملکرد و مولفه‌های پر شدن دانه تحت تأثیر فاکتورهای آزمایشی

Table 6- Analysis of variance grain filling components and yield under experimental factors

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean squares			
		طول دوره پر شدن دانه Grain filling period	سرعت پر شدن دانه Grain filling rate	دوره موثر پر شدن دانه Effective grain filling period	عملکرد دانه Grain yield
Replication تکرار	2	1889.29	2.56	1.07	919674.88
Irrigation (I) آبیاری	2	18.92^{**}	4.62^{**}	175.70^{**}	10748405.21^{**}
Biofertilizer (B) کود زیستی	3	6.36^{**}	3.74^{**}	74.03^{**}	7176908.25^{**}
Nano-Si (N-Si) نانوسیلیکون	2	6.30^{**}	3.70^{**}	65.48^{**}	5809863.99^{**}
I×B	6	2.33^{**}	2.007^{**}	7.83^{**}	480148.99^{**}
I×N-Si	4	11.18^{**}	6.95^{**}	5.30^{ns}	76486.35^{ns}
B×N-Si	6	2.72^{**}	3.85^{**}	17.78^{**}	424995.53^{**}
I× B× N-Si	12	1.98^{**}	3.29^{**}	5.73^{*}	130796.09^{**}
Error اشتباه آزمایشی	70	4.49	7.48	2.84	58836.63
C.V (%) ضریب تغییرات	-	5.0	2.5	7.1	8.7

ns, * and ** indicating non-significant and significant at 5 and 1 % level, respectively

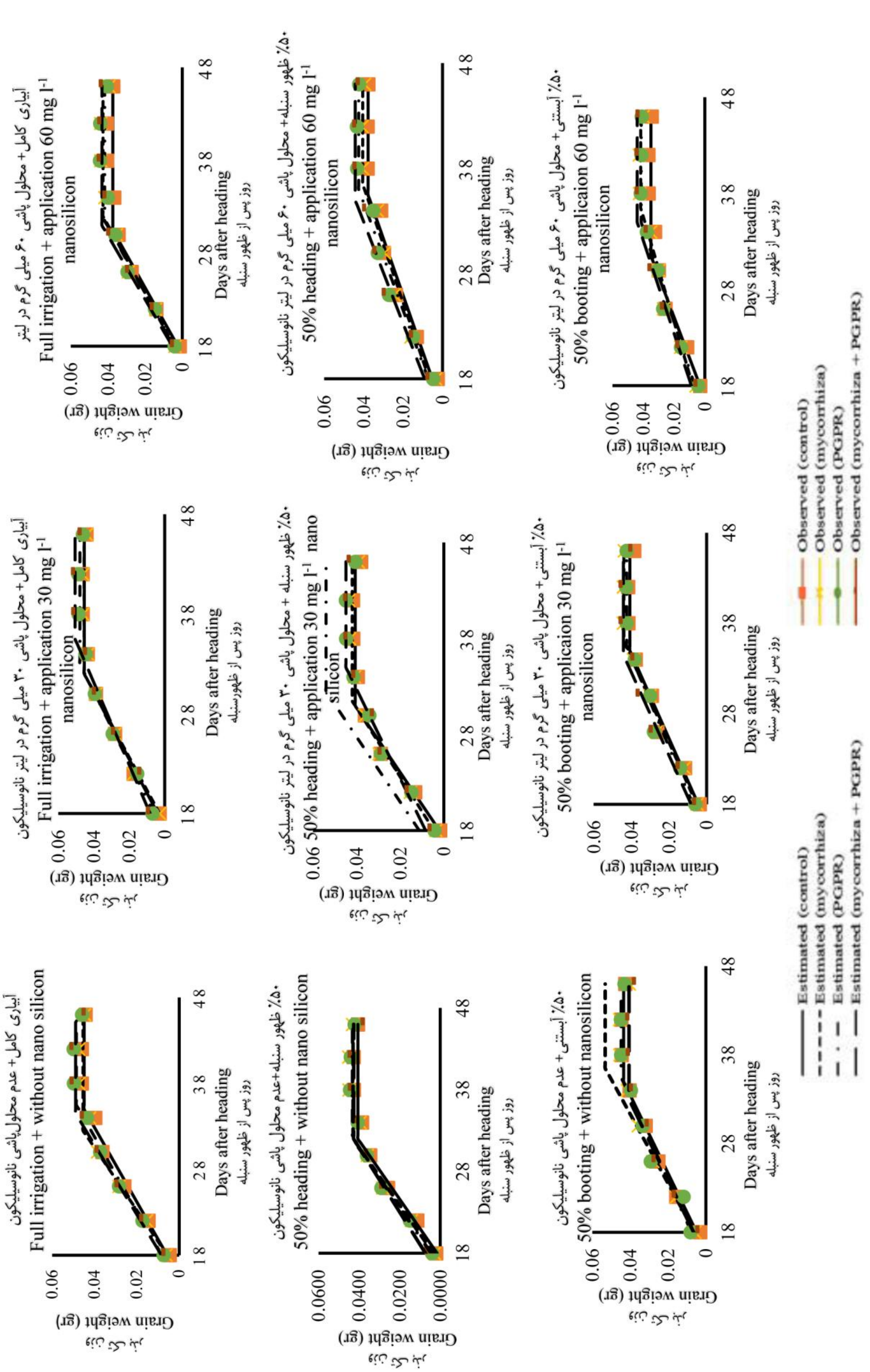
ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ ٪

بخشی از کاهش مولفه‌های پر شدن دانه در شرایط تنش را می‌توان به کاهش شاخص سطح برگ تحت چنین شرایطی نسبت داد (جدول ۵). در این راستا گزارش شده است که در بیشتر موارد اثر احتمالی تنش آبی بر سرعت پر شدن دانه از طریق محدودیت فراهمی مواد جذبی اعمال می‌شود که ناشی از اثر مستقیم تنش بر کاهش سطح برگ و کاهش فتوسنتز گیاهی است (Savin and Nicolas, 1999). از طرفی مشخص شد که تنش شدید سبب کاهش طول دوره پر شدن دانه شد به‌نحوی‌که، دوره پر شدن دانه از افزایش ۱۷

درصدی در شرایط آبیاری کامل نسبت به قطع آبیاری در مرحله چکمه‌ای شدن برخوردار بود. بیشترین دوره پر شدن دانه (۳۷ روز) از ترکیب تیماری محلول‌پاشی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون و تلقیح توأم بذر با باکتری‌های محرک رشد و مایکوریزا در شرایط آبیاری کامل و کمترین آن (۳۰/۷۸ روز) از عدم تلقیح بذر با کودهای زیستی و عدم محلول‌پاشی در شرایط تنش شدید به‌دست آمد. به نظر می‌رسد در شرایط محدودیت آبی گیاه سعی می‌کند با کوتاه کردن طول دوره پر شدن دانه، هرچه سریع‌تر مراحل رشد خود را به پایان رسانده و از برخورد با شرایط تنش فرار کند. طوری‌که مقایسه میانگین‌ها نیز نشان داد که حداکثر دوره موثر پر شدن دانه (۳۰/۴۴ روز) از ترکیب تیماری محلول‌پاشی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون و تلقیح توأم بذر با باکتری‌های محرک رشد و قارچ مایکوریزا در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد، که از افزایش ۲۳ درصدی نسبت به عدم محلول‌پاشی نانوسیلیکون و تلقیح بذر با کودهای زیستی در شرایط تنش شدید برخوردار بود. نتایج مشابهی نیز توسط پژوهشگران مبنی بر این‌که تنش خشکی موجب کاهش طول دوره پر شدن دانه گندم می‌شود گزارش شده است (Lemon *et al*., 2007). بخشی از کاهش طول دوره پر شدن دانه علاوه بر محدودیت آبی می‌تواند با افزایش دمای محیط در ارتباط باشد (جدول ۱). طوری‌که بررسی پارامترهای جوی ثبت شده در طول دوره پر شدن دانه نیز نشان می‌دهد علاوه بر اثر محدودیت آبی، دمای هوا نیز در این دوره از رشد گیاه بالا بوده است که اثرات ناشی از محدودیت آبی را تشدید می‌کند. در این راستا بیان شده است که در طی مرحله پر شدن دانه، خشکی اگر با دمای بالا همراه باشد می‌تواند موجب تسریع پیری و کاهش دوره پر شدن دانه شود (Pashnezhad *et al*., 2006). در واقع در شرایط آبیاری کامل، سرعت و طول دوره پر شدن دانه افزایش داشته و با محدودیت شدید آبی صفات ذکر شده روند نزولی را داشتند. در این زمینه پژوهشگران اظهار داشتند که تنش‌های محیطی سبب کاهش طول دوره پر شدن دانه گیاه می‌شود ولی با تأمین آب کافی، طول دوره موثر پر شدن دانه نیز بیشتر می‌شود (Ouk *et al*., 2003). بخشی از افزایش وزن دانه در شرایط آبیاری کامل و کاربرد نانوسیلیکون و کودهای زیستی می‌تواند ناشی از تاثیر این فاکتورها بر سرعت و طول دوره پر شدن دانه (جدول ۷) و بخش دیگر ناشی از اثر عوامل مورد بررسی بر وزن و حجم ریشه (جدول ۵) باشد. به‌نحوی‌که محققین بیان داشتند که کودهای زیستی سبب افزایش سطح ریشه گیاه می‌شوند و افزایش سطح ریشه گیاه به‌دلیل دسترسی بیشتر به آب و مواد غذایی منجر به افزایش رشد گیاه نیز می‌گردد. همچنین آنان اظهار داشتند که افزایش میزان جذب آب و املاح، موجب بالا رفتن نقل و انتقال مواد به دانه شده در نهایت می‌تواند سرعت پر شدن دانه و عملکرد دانه را افزایش دهد (Banerjee *et al*., 2006). در واقع به‌نظر می‌رسد که کاربرد کودهای زیستی با افزایش شاخص سطح برگ (جدول ۵) و محتوای کلروفیل (جدول ۴)، موجب افزایش میزان آسیمیلاسیون شده و این امر با افزایش نقل و انتقال مواد به دانه ضمن افزایش سرعت پر شدن دانه، امکان تداوم بیشتر دوره پر شدن دانه را نیز فراهم ساخته‌اند (Zamber *et al*., 1984).

عملکرد دانه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ترکیب تیماری سطوح آبیاری در کودهای زیستی در نانو سیلیکون بر عملکرد دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). بیشترین عملکرد دانه (۴۵۹۳ کیلوگرم در هکتار) از کاربرد توأم قارچ مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد و مصرف ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط آبیاری کامل و کمترین عملکرد دانه (۱۲۵۷ کیلوگرم در هکتار) از عدم کاربرد کودهای زیستی و نانوسیلیکون در شرایط تنش شدید (قطع آبیاری در مرحله آبستنی) به‌دست آمد (شکل ۲). به‌نحوی‌که عدم کاربرد نانوسیلیکون و کودهای زیستی در شرایط تنش شدید (قطع آبیاری در مرحله آبستنی)، سبب کاهش ۵۵ درصدی عملکرد دانه نسبت به کاربرد ۳۰ میلی‌گرم در لیتر محلول‌پاشی نانوسیلیکون و تلقیح توأم بذر با قارچ مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد در این شرایط گردید. البته رقم میهن از پتانسیل تولید بالایی در شرایط مطلوب برخوردار است ولی بخشی از کاهش عملکرد این گیاه می‌تواند با بالا بودن ساعات آفتابی و میانگین بالای دما و کمی نزولات در ماه‌های تیر و خرداد (جدول ۱) که مصادف با دوره پر شدن دانه است در ارتباط باشد.

بخشی از کاهش عملکرد دانه با کاهش طول دوره پر شدن دانه در ارتباط است و به نظر می‌رسد زمانی‌که گیاه در مرحله پر شدن دانه با شرایط تنشی مواجه است، به دلیل فرار از شرایط تنشی طول دوره زایشی خود را کاهش داده و همین امر منجر به کاهش وزن دانه و در نتیجه کاهش عملکرد می‌شود. در این زمینه گزارش شده است که هرچه محدودیت آبی افزایش یابد، به دلیل فرصت کم‌تر گیاه برای انتقال مواد فتوسنتزی به سمت بخش اقتصادی، عملکرد دانه کاهش می‌یابد (Karmolachab *et al*., 2014). همچنین بروز تنش خشکی طی مرحله گلدهی، از بزرگ شدن سلول پیش از تقسیم سلولی جلوگیری نموده و تعداد دانه‌های لقاح‌یافته و در نهایت تعداد لقاح‌های موفق را کاهش می‌دهد که نتیجه این عوامل از طریق بازداری مراحل مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مانند فتوسنتز، تنفس، انتقال، جذب یونی، متابولیسم عناصر غذایی و هورمون‌ها، عملکرد را محدود می‌سازد (Blum, 2005). بخشی از اثر سودمند کاربرد نانوسیلیکون و تلقیح توأم باکتری و قارچ در شرایط تنش خشکی را می‌توان به افزایش مولفه‌های پر شدن دانه (جدول ۷)، افزایش شاخص سطح برگ و وزن و حجم ریشه (جدول ۵) و رنگیزه های فتوسنتزی (جدول ۴) نسبت داد. طوری‌که نتایج مقایسه میانگین اثر هر یک از عوامل آزمایشی نشان داد با کاربرد سیلیکون و کودهای زیستی محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی افزایش یافت (جدول ۴).



شکل ۱ – تأثیر کودهای زیستی، نانوسیلیکون و سطوح آبیاری بر روند پر شدن دانه گندم

Figure 1- Effect of irrigation levels, bio-fertilizer and nano silicon on grain filling period of wheat

جدول ۷- مقایسه میانگین مولفه‌های پر شدن دانه گندم متأثر از کاربرد کودهای زیستی، نانوسیلیکون در شرایط قطع آبیاری

Table 7- Means comparison grain filling components of wheat as affected of bio-fertilizer, nano silicon under irrigation withholding condition

سطوح آبیاری Irrigation levels	ترکیب تیماری Treatments	سرعت پر شدن دانه Grain filling rate ($mg.day^{-1}$)	طول دوره پر شدن دانه Grain filling Period (day)	دوره موثر پر شدن دانه Effective grain filling period (day)
I_1	B_0S_0	2.31	34.56	26.59
	B_1S_0	2.46	35.25	25.47
	B_2S_0	2.31	35.40	28.67
	B_3S_0	2.75	36.01	28.85
	B_0S_1	2.42	35.12	28.74
	B_1S_1	2.79	35.62	29.66
	B_2S_1	2.96	36.21	29.81
	B_3S_1	3.04	37.00	30.44
	B_0S_2	2.73	34.79	25.46
	B_1S_2	2.77	35.48	29.08
	B_2S_2	2.80	35.62	28.36
	B_3S_2	2.91	36.48	29.23
I_2	B_0S_0	2.53	31.38	23.99
	B_1S_0	2.77	32.26	25.58
	B_2S_0	2.79	32.70	26.25
	B_3S_0	2.83	34.92	26.80
	B_0S_1	2.15	32.77	27.64
	B_1S_1	2.59	34.93	28.05
	B_2S_1	2.78	35.15	27.64
	B_3S_1	2.97	34.44	28.63
	B_0S_2	1.86	31.83	25.03
	B_1S_2	2.13	32.49	27.90
	B_2S_2	1.96	35.00	28.02
	B_3S_2	2.07	35.33	26.41
I_3	B_0S_0	1.82	30.78	23.59
	B_1S_0	2.28	31.19	24.57
	B_2S_0	2.27	31.63	24.38
	B_3S_0	2.56	31.86	24.96
	B_0S_1	2.01	31.88	24.12
	B_1S_1	2.14	31.82	25.51
	B_2S_1	2.15	32.64	25.14
	B_3S_1	2.18	34.47	26.80
	B_0S_2	1.83	30.94	24.19
	B_1S_2	2.05	31.40	24.97
	B_2S_2	2.07	33.14	24.70
	B_3S_2	2.36	32.08	26.40
	LSD	1.00	0.62	1.60

I_1، I_2 و I_3: به‌ترتیب آبیاری کامل، آبیاری تا خوشه‌دهی و آبیاری تا آبستنی؛ B_0، B_1، B_2 و B_3: به‌ترتیب عدم تلقیح، تلقیح با قارچ، تلقیح با باکتری و تلقیح توأم قارچ و باکتری

S_0، S_1 و S_2: به‌ترتیب شاهد، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون

I_1, I_2 and I_3: No stress, Mild stress Severe stress

B_0, B_1, B_2 and B_3: Non-inoculated, Inoculated with *Mycorrhiza*, Inoculation with bacteria and Co-inoculation of *Mycorrhiza* and bacteria

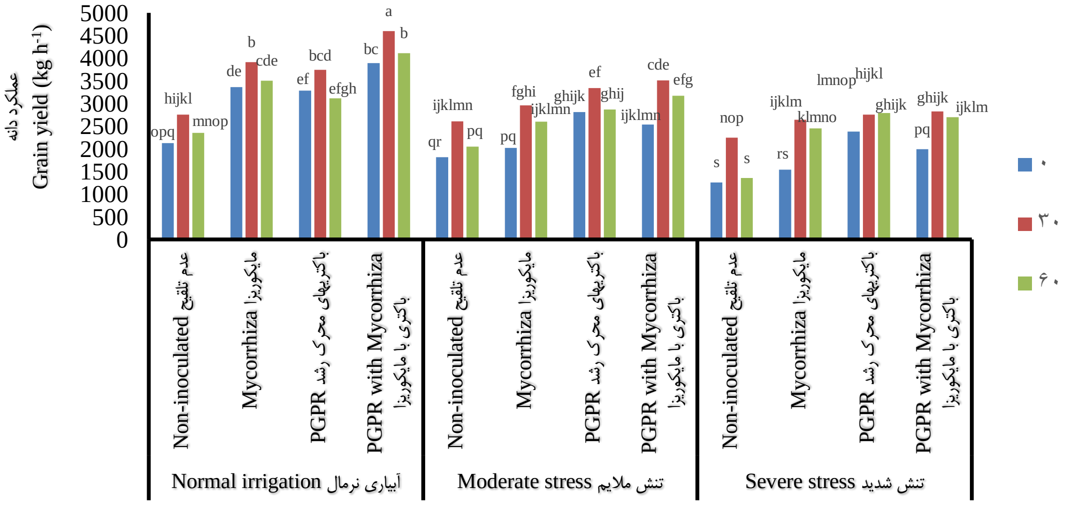
S_0, S_1 and S_2: 0, 30 and 60 mg L^{-1} silicon

طبق پژوهشی در این زمینه گزارش شده است که سیلیکون از طریق کاهش تخریب رنگدانه‌ها و بهبود ساختار کلروفیل موجب می‌شود که فتوسنتز جاری تداوم بیشتری داشته و همین امر می‌تواند به افزایش طول دوره پر شدن دانه و بهبود عملکرد دانه‌ی کلزا در شرایط محدودیت آبی منجر شود (Bybordi, 2016). همچنین پژوهشگران، افزایش تحمل به خشکی در گیاهان با کاربرد نانوسیلیکون را به حفظ توازن آب و بهبود کارایی فتوسنتزی، نسبت دادند (Subra Manian *et al*., 2006).

نتیجه‌گیری

کاربرد توأم و تک تک کودهای زیستی (قارچ مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد) و همچنین محلول‌پاشی نانوسیلیکون ضمن افزایش مولفه‌های پر شدن دانه، رنگدانه‌های فتوسنتزی، وزن و حجم ریشه موجب تعدیل اثر تنش آبی شد. به‌طوری‌که، مصرف توأم قارچ

مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد و محلول‌پاشی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط تنش شدید در مقایسه با عدم کاربرد نانوسیلیکون و کودهای زیستی در این شرایط سبب گردید تا خسارات ناشی از تنش خشکی بر عملکرد دانه جبران شود.



شکل ۲- اثر سطوح آبیاری، کودهای زیستی و نانوسیلیکون بر عملکرد دانه

Figure 2- Effect of irrigation levels, bio-fertilizer and nano silicon on grain yield

بنابراین پیشنهاد می‌شود که از عنصر سیلیکون به‌عنوان یک عنصر ضروری جهت استفاده از آن در تنش‌های محیطی از جمله خشکی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین تلقیح بذر با کودهای زیستی به دلیل این‌که هم در شرایط تنش خشکی و هم آبیاری کامل باعث بهبودی رشد و ارتقای عملکرد گندم گردید، بنابراین کاربرد این نوع از کودها در شرایط تنش برای بهبودی گیاه در جهت کشاورزی پایدار پیشنهاد می‌شود. از این رو، به‌نظر می‌رسد برای تعدیل بخشی از اثر ناشی از محدودیت شدید آبی در طول فصل رشد گندم در جهت کمک به بهبود عملکرد دانه، محلول‌پاشی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیکون و کاربرد توأم مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد روشی مناسب باشد. از طرفی پیشنهاد می‌شود که در آزمایش‌های بعدی علاوه بر بررسی عملکرد و مولفه‌های پر شدن دانه به بررسی عوامل فیزیولوژیک و بیوشیمیایی نیز پرداخته شود تا نقش این عوامل بر افزایش عملکرد دانه بیشتر مشخص گردد.

References

1. AL-Aghabary, K., Zhujun, Z., and Qinhua, S. 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plant under salt stress. Journal of Plant Nutrition 27 (12): 2101-2115.
2. Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoxidase in beta vulgaris. Plant Physiology 24: 1-15.
3. Banerjee, M., Yesmin, R. L., and Vessey, J. L. 2006. Plant-growth- promoting rhizobacteria as biofertilizers and biopesticides. In: Handbook of microbial biofertilizers. Food Production Press, U.S.A. 137-181.
4. Basal, O., and Szabo, A. 2020. Ameliorating drought stress effects on soybean physiology and yield by hydrogen peroxide. Agriculture Conspectus Scientificus 85 (3): 211-218.
5. Biglouie, M. H., Assimi, M. H., and Akbarzadeh, A. 2010. Effect of water stress at different stages on quantity and quality traits of virginia (flue cured) tobacco type. Plant Soil Environment 2: 67-75.
6. Blum, A. 2005. Drought resistance, water use efficiency, and yield potential are they compatible, dissonant, or mutually exclusive. Australian Journal of Agricultural Research 56 (11): 1159-1168.
7. Boomsma, C.R., and Vyn, T.J. 2008. Maize drought tolerance: Potential improvements through arbuscular mycorrhizal symbiosis. Field Crops Research 108 (1): 14-31.
8. Bybordi, A. 2016. Influence of zeolite, selenium and silicon upon some agronomic and physiologic characteristics of canola grown under salinity. Communications in Soil Science and Plant Analysis 47 (7): 832-850.
9. Chen, J. H. 2006. The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility. Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C. 11 pp.

10. Dakora, F. D., and Nelwamondo, A. 2003. Silicon nutrition promotes root growth and tissue mechanical strength in symbiotic cowpea. Functional Plant Biology 30 (9): 947-953.
11. Datnoff, L. E., Synder, G. H., and Korndorfer, G. H. 2001. Silicon in agriculture. Elsevier. Amesterdam. 285 p.
12. Ellis, R. H., and Pieta-Filho, C. 1992. The development of seed quality spring and winter cultivars of barley and wheat. Seed Science Research 2: 19-25.
13. Emadi, N., Jahangin, Sh., and Balochi, H. R. 2013. Effect of drought Stress and plant density on yield and some physiological characters of pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Yasouj region. Journal of Crop Production 5 (2): 1-17.
14. Gianinazzi, S., Schuepp, H., Barea, J. M., and Haselwandter, K. 2001. Mycorrhizal technology in agriculture: from genes to bioproducts. Birkhauser, Basel. ISBN: 376436858. Also in: Mycorrhiza. 13, 53-54. Lovato, P. Book review.
15. Giri, B., and Mukerji, K. G. 2004. Mycorrhizal inoculant alleviates salt stress in Susana aegyptiaca and Sesbania grandiflora under field conditions, evidence for reduced sodium and improved magnesium uptake. Mycorrhiza 14: 307-312.
16. Gong, H. J., Chen, K. M., Chen, G., Wang, S., and Zhang, C. L. 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. Journal of Plant Nutrition 26 (5): 1055-1063
17. Hadi, H., Seyed Sharifi, R., and Namvar, A. 2016. Phytoprotectants and Abiotic Stresses. Urmia University press. 342p.
18. Karmolachab, A., Bakhshandeh, A. M., Gharineh, M. H., Moradi-Talavat, M. R., and Fathi, Gh. 2014. Effect of silicon application on morphophysiological, yield, and seed mineral elements content of wheat under water stress. Agricultural and Gardening Production and Processing Journal 14: 133-144.
19. Khalafallah, A. A., and Abo-Ghalia, H. H. 2008. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the metabolic products and activity of antioxidant system in wheat plants subjected to short-term water stress, followed by recovery at different growth stages. Journal of Applied Sciences Research 4: 559-569.
20. Kheirizadeh Arough, Y., and Seyed Sharifi, R. 2016. Biofertilizers and zinc effects on some physiological parametrs of triticale under water limitation. Journal of Plant Interactions 11 (1): 167-177.
21. Lemon, J. 2007. Nitrogen management for wheat protein and yield in the sperance port zone. Department of agriculture and food publisher. Western Australia, Perth. Bulletin 4707.
22. Liu, F., Andersen, M. N., and Jensen, C. R. 2004. Root signal controls pod growth in droughtstressed soybean during the critical, abortion-sensitive phase of pod development. Field Crop Research 85:159-166.
23. Marulanda Aguirre, A., Azcon, R., Manuel Ruız Lozano, J., and Aroca, R. 2008 Differential effects of a bacillus megaterium strain on lactuca sativa plant growth depending on the origin of the arbuscular mycorrhizal fungus coinoculated: physiologic and biochemical traits. Journal of Plant Growth Regulation 27 (1): 10-18.
24. Merwad, A. R. M. A., Desoky, E. S. M., and Rady, M. M. 2018. Response of water deficit-stressed Vigna unguiculata performances to silicon, proline or methionine foliar application. Scientia Horticulturae 228: 132-144.
25. Mohammdaparst, B., Hatami, A., Rostami, M., and Azizi, A. 2019. Effect of seed priming with salicylic acid and plant growth promoting bacteria on some morpho-physiological traits of mung bean (*Vigna radiata*). Journal of Plant Ecophysiology 36: 190-203.
26. Mozafari, A., Habibi, D., Asgharzade, A., and Mashhadi Akbar Boujar, M. 2016. Investigation of drought tension tolerance in two wheat cultivars inoculated with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) under greenhouse conditions. Journal of Crop Physiology 31 (8): 21-29.
27. Ouk, M., Shu, F., Ken, F., Jaya, B., Mark, C., and Harry, N. 2003. Routine selection for drought resistance in rain fed lowland rice (*Oryza sativa* L.) in Cambodia. In: Proceedings of the International Conference on Research on Water in Agriculture, CARDI, Cambodia. 25-29.
28. Paknezhad, F., Majid Hervan, A., Nourmohammadi, A., Sayyadat, A., and Wazan, S. 2010. Evaluation of the effect of drought stress on effective traits on the accumulation of materials in grain of different wheat cultivars. Agricultural Science 13: 149-137.
29. Parsapour, O., Bakhshandeh, A. M., Gharineh, M. H., Feizi, H., and Moradi Telavat, M. R. 2019. The effect of foliar application of nano- and bulk silicon dioxide particles on grain yield and redistribution of dry matter in wheat under drought stress. Environmental Stresses in Crop Sciences 12 (2): 377-388.
30. Prasad, T. N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja Reddy, K., Sreeprasad, T. S., and Sajanlal, P. R. 2012. Effect of nanoscale Zinc-oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. Journal of Plant Nutrition 35: 905-927.
31. Ronanini, D., Savin, R., and Hal, A. J. 2004. Dynamic of fruit growth and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to brief interval of high temperature during grain filling. Field Crop Research 83: 79-90.
32. Roychoudhury, A. 2020. Silicon-nanoparticles in crop improvement and agriculture. International Journal on Recent Advancement in Biotechnology & Nanotechnology 3: 54-65.
33. Salantur, A., Ozturk, A., and Akten, S. 2006. Growth and yield response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to inoculation with rhizobacteria. Journal of Soil Environment 52 (3): 111-118.

34. Savin, R., and Nicolas, M. E., 1999. Effects of timing of heat stress and drought on growth and quality of barley grains. Australian Journal of Agricultural Research 50 (3): 357-364.
35. Savvas, D., and Ntatsi, G. 2015. Biostimulant activity of silicon in horticulture. Scientia Horticulturae 196: 66-81.
36. Seyed Sharifi, R. 2018. Effects of uniconazole and bio fertilizers on grain filling period and contribution of remobilization in grain yield of wheat under different moisture regimes in greenhouse condition. Environmental Stresses in Crop Sciences 11 (3): 515-531.
37. Sifola, M. I., and Barbieri, G. 2006. Growth, yield and essential oil content of three cultivars of basil growth under different levels of nitrogen in the field. Scientic Horticulturae 108 (4): 408-413.
38. Subra Manian, K. S., Santhane Krishnan, P., and Bala subramanian, P. 2006. Responses of field grown tomato plants to arbascular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. Scientia Horticulture 107: 245-253.
39. Sun, C. W., Liang, Y. C., and Romheld, V. 2005. Effects of foliar- and root applied silicon on the enhancement of induced resistance to powdery mildow in *cucumis sativus*. Journal of Plant Pathol 54: 678-685.
40. Turk, M. A., Assaf, T. A., Hameed, K. M., and Al-Tawaha, A. M. 2006. Effect of soil amendment with olive mill by products under soil solarization on growth and productivity of faba bean and their symbiosis with mycorrhizal. World Journal Agricultural Science 2 (1): 1817-3047.
41. Wen-Bin, W., Yun-Hee, K., Haeng-Soon, L., Ki-Yong, K., and Xi-Ping, D. 2009. Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses. Plant Physiology and Biochemistry 47: 570-577.
42. Zamber, M. A., Konde, B. K., and Sonar, K. R. 1984. Effect of Azotobacter chroocucoom and Azosprillum brasilense inoculation under graded levels of nitrogen on growth and yield of wheat. Journal of Plant Soil 79: 61-67.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 19, No. 1, Spring. 2021, p. 91-105

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، ص. ۱۰۵-۹۱

Effects of Nano Silicon Concentrations and Bio-fertilizer on Yield and Grain Filling Components of Wheat in Different Irrigation Regimes

F. Ahmadi Nouraldinvand[1*], R. Seyed sharifi[2], S. A. Siadat[3], R. Khalilzadeh[4]

Received: 29-11-2020
Accepted: 09-02-2021

Introduction

Water limitation can damage pigments and plastids, reduce chlorophyll a, chlorophyll b, rate and grain filling period. One approach to improve the water stress problem is the use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and *Mycorrhiza*. The PGPR are a group of rhizosphere colonizing bacteria that produces substances to increase the growth of plants, synthesize different phytohormones, including auxin, cytokinin, and gibberellin, synthesize enzymes that can modulate plant growth and development. *Arbuscular mycorrhizal* fungi (AMF) symbiosis is considered a valuable component in most agricultural systems due to their role in plant nutrition and soil health. Silicon (Si) is considered as quasi-essential for plant growth and development, and alleviates toxic effects caused by various environmental stresses in plants. So, it seems that application of nano silicon and bio-fertilizer can improve wheat yield under water limitation conditions.

Materials and Methods

In order to study the effect of nano silicon and bio-fertilizer on yield and grain filling components of wheat in different irrigation levels, a factorial experiment was conducted based on randomized complete block design with three replications at the research farm of faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili in during 2018-2019. The experimental factors were included irrigation in three levels (full irrigation as control, moderate water limitation or irrigation withholding at 50% of heading stage; severe water limitation or irrigation withholding at 50% of booting stage) based on codes 55 and 43 of the BBCH scale, foliar application of nano silicon (foliar application with water as control, 30, and 60 mg L^{-1}) and bio-fertilizer (no application as control, mycorrhiza application, both application of flavobacterium and pseudomonas, both application of flavobacterium and pseudomonas with mycorrhiza). Mycorrhiza fungi (*mosseae)* was purchased from the Zist Fanavar Turan corporation and soils were treated based on method of Gianinazzi *et al.* (2001). *Psedomunas* and *flovobacterium* were isolated from the rhizospheres of wheat by Research Institute of Soil and Water, Tehran, Iran. A two part linear model was used to quantifying the grain filling parameters. In this study, total chlorophyll, chlorophyll a, b, carotenoid, grain filling components and yield of wheat were investigated. Grain dry weight and number were used to calculate the average grain weight for each sample. Total duration of grain filling was determined for each treatment combination by fitting a bilinear model:

$$GW = \begin{cases} a + bt_0 & t < t_0 \\ a + bt & t \geq t_0 \end{cases}$$

Effective grain filling duration (EGFD) was calculated from the below equation:
EGFD = the highest grain weight (g)/rate of grain filling (g day^{-1}).

Results and Discussion

Means comparison showed that highest grain filling rate (3.04 mg day^{-1}), grain filling period (37 day), effective grain filling period (30.44 day) and grain yield (4593 kg ha^{-1}) were obtained at foliar application of 30 mg L^{-1} nano silicon, both application of flavobacterium and pseudomonas with mycorrhiza under normal irrigation. Also, maximum of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoid content (2.04, 0.93, 2.87 and 9.89 mg g^{-1} FW^{-1} respectively) were obtained at foliar application of 60 mg L^{-1} nano silicon in seed inoculation with flavobacterium and pseudomonas under normal irrigation. Maximum of volume and root dry weight were obtained at foliar application 60 mg L^{-1} nano silicon and mycorrhiza application fungi under normal irrigation. The highest leaf area index was obtained at both applications of flavobacterium and pseudomonas

1- PhD Student of Crop Plants Physiology, Department of Plant Production and Genetic Engineering, University of Mohaghegh Ardabili
2- Professor, Department of Plant Production and Genetic Engineering, University of Mohaghegh Ardabili
3- Professor, Department of Plant Production and Genetic Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan
4- PhD Crop Plants Physiology, Department of Plant Production and Genetic Engineering, university of Urmia
(*- Corresponding Author Email: Farnaz_ahmadi@rocketmail.com)

with mycorrhiza, foliar application 30 mg L^{-1} nano silicon under normal irrigation.

Conclusions

Generally, it seems that application of bio-fertilizers and nano silicon can be recommended as appropriate management factors for increasing grain yield and grain filling components of wheat under water limitation conditions.

Keywords: Drought, Mosseae fungi, Nanoparticles, PGPR, Photosynthetic pigments